

単一ハイドロフォンを用いた 相模湾初島沖深海底におけるマッコウクジラ鳴音の位置推定の検討*

○岩瀬良一 (JAMSTEC)

1 はじめに

マッコウクジラは、クリックと呼ばれる鳴音を1秒前後の間隔で発しながら、捕食等のため深海まで潜航する行動を繰り返すことが知られている^[1]。一方、相模湾初島南東沖の深海底(水深 1175 m)に設置されている海底ケーブル型観測システム「深海底総合観測ステーション」(以下、「初島沖ステーション」)搭載ハイドロフォンによる20年以上の長期アーカイブデータから、マッコウクジラの鳴音が季節に関係なくほぼ通年検出されていることが明らかとなった^[2]。相模湾において時に船舶との衝突事故も発生するマッコウクジラの生態を詳細に理解するためには、その潜航行動の把握は重要な情報である。しかしながら、初島沖ステーションに搭載されているハイドロフォンは1台のみであるため、通常複数のハイドロフォンによる音波の到達時間差等を用いて実現される音源定位手法^[3]は、これらの検出鳴音に対して適用できない。こうした中で、一部の鳴音には海面反射と思われる後続波が確認されている^[4]ことに加え、海中での位置が既知で後続波を伴う人工音を前記アーカイブデータに見出した。そこで、今回この人工音の解析を通じた音源位置、即ち音源深度と観測点からの水平距離の推定方法を検討し、鳴音への適用可能性を検討した。

2 音源の位置推定

2.1 人工音源

音源位置推定の検討に用いた人工音源は、無人探査機(ROV)「ドルフィン3K」のレスポンスが発するパルス信号である。潜航中の支援母船による音響測位に用いるため、周波数 15.5 kHz のパルス信号を ROV の本体(ビークル)から10秒間隔で送出している。1999年6月10日に実施された潜航時のパルス信号が、アーカイブデータに含まれていた。

単一ハイドロフォンによる海面及び海底の多重反射波を用いた音源定位手法は、多重反射波が観測される水深一定の浅海域については、イルカの鳴音を対象とした文献[5]等の先行研究がある。しかしながら、本研究対象の深海域では、必ずしも多重反射波が観測されるわけではないので、水深一定と仮定するにしても、この手法がそのまま適用できるわけではない。今回使用した ROV からのパルス信号は、多重反射波の検出が可能な音源強度を有していた。Fig. 1 は、バンドパス・フィルタを通した観測波形(第426潜航)について、振幅の絶対値の波形(エンベロープ)を作成し、直達波の到達時刻を基準とし、横軸を到達時間差としたエンベロープを時刻順に縦方向に並べたもの(ペーストアップ)である。なお、観測波形にはビークルからの 15.5 kHz のパルス信号の他、テザーケーブル中間に取り付けられたトランスポンダや支援母船から発せられる近接周波数のパルス信号も含まれている。図中の A, B, C で示した信号が、それぞれビークルからのパルス信号の直達波、海面反射波(1次海面反射波)及び海底-海面反射波(1次海底反射波)である。

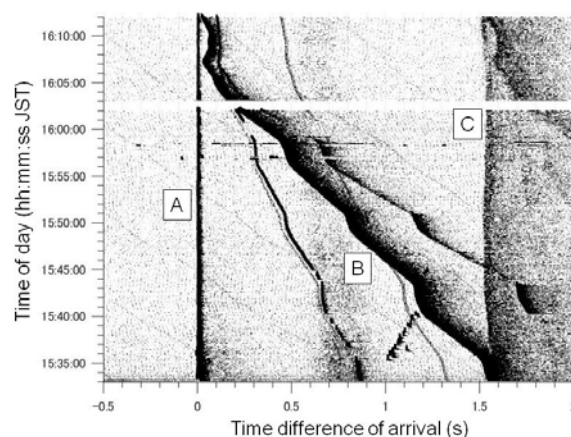


Fig. 1 Paste-up waveform of pulse signal from ROV.

観測点を含む水深(D)と海中の音速(V)をい

* Investigation of location estimation of sperm whale vocalizations with a single hydrophone on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay, by IWASE, Ryoichi (JAMSTEC).

ずれも一定 ($D = 1175$ m, $V = 1485.8$ m/s : 当該潜航時にビークルに搭載した塩分濃度・水温・深度計測プロファイルに基づく平均音速) と仮定し、音源深度と音源一観測点間の水平距離をそれぞれ d , r とする。1 次海面反射波と 1 次海底反射波の直達波からの到達時間差をそれぞれ ΔT_{1s} , ΔT_{1b} とすると、以下の 2 つの関係式が成り立つ。

$$\Delta T_{1s} = \frac{\sqrt{(D+d)^2 + r^2} - \sqrt{(D-d)^2 + r^2}}{V} \quad (1)$$

$$\Delta T_{1b} = \frac{\sqrt{(3D-d)^2 + r^2} - \sqrt{(D-d)^2 + r^2}}{V} \quad (2)$$

観測値 ΔT_{1s} , ΔT_{1b} に対応する未知数 d , r は、上記の連立方程式を解くことで求められる。結果を Fig. 2 に示す。上段が深度(d)、下段が水平距離(r)、白抜きが上記方程式から得られた結果、黒点が支援母船の音響測位に基づく実際の測位データである。深度はほぼ合っているが、水平距離には最大で 500 m 程度の相違が見られる。これは、主に水深及び音速を一定と仮定したことからのずれに起因する。

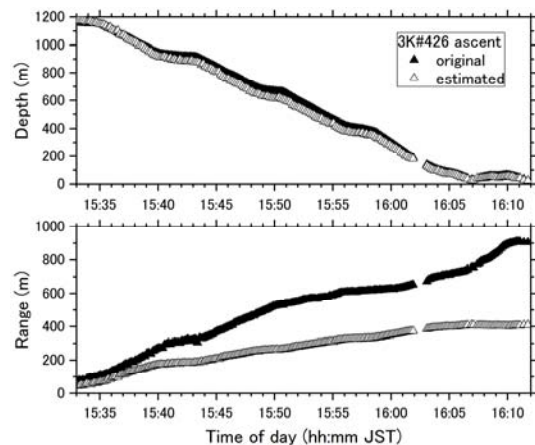


Fig. 2 Estimated and original depth (top) and horizontal range (bottom) of ROV.

2.2 マッコウクジラ鳴音

顕著な後続波を伴うマッコウクジラ鳴音の例として、2003 年 7 月 11 日 07:48 JST の観測波形について、2 kHz のハイパス・フィルタ適用の後、Fig. 1 と同様に作成したペーストアップを Fig. 3 に示す。直達波と 1 次海面反射波は、それぞれ A, B で示す位置に明瞭に確認できるが、Fig. 1 と異なり、1 次海底反射波は確認できず、前節の手法は適用できない。そこで別の手法として、上昇・下降に際しては、同一水平距離の地点を一定速度で移動すると仮定した音源位置推定手法を検討した。

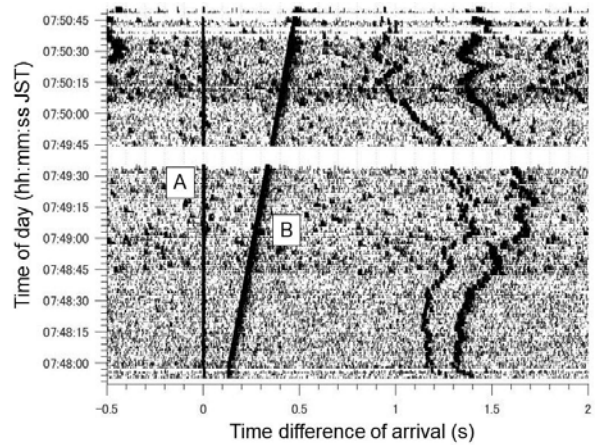


Fig. 3 Paste-up waveform of sperm whale vocalization.

具体的には、まず式(1)を下記の式(3)に変形する。一定の上昇・下降速度を v とすれば、時刻 t における深度は、初期時刻の深度を d_0 として式(4)となる。そこで各観測値 ΔT_{1s} と対応時刻 t のデータセットに対して、式(3)と(4)の各右辺の差分の二乗和が最小となるような r , v , d_0 を求めて、 d を得るものである。

$$d = \frac{V\Delta T_{1s}}{2} \sqrt{\frac{r^2}{D^2 - \left(\frac{V\Delta T_{1s}}{2}\right)^2} + 1} \quad (3)$$

$$d = d_0 + vt \quad (4)$$

しかしながら、無条件でこれら 4 つの未知数を求めようとすると、 $r=0$ が最適解となってしまう。そこで拘束条件として速度 v を先見情報として仮定する。前節の人工音源に対し、 v に実際の平均上昇速度を用いて本手法を適用したところ、得られた深度及び水平距離の実際の音響測位データとの相違はそれぞれ最大で 60 m 及び 400 m 程度であった。Fig. 3 の鳴音については、文献[1]を参考に下降速度を 1.2 m/s としたところ、水平距離 0 m で、深度 100 m 付近から 340 m 付近まで下降する結果を得た。今後、他の人工音源と鳴音の観測波形により手法の検証を進める予定である。

参考文献

- [1] Watwood *et al.*, J. Animal Ecology, 75, 814-825, 2006.
- [2] 岩瀬, 音講論 (春), 1115-1116, 2017.
- [3] Li *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 87, 041502, 2016.
- [4] R. Iwase *et al.*, Proc. UT11+SSC11, 10.1109/UT.2011.5774125, 2011.
- [5] Aubauer *et al.*, J. Acoust. Soc. Am., 107(5), 2744-2749, 2000.